

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARTS ET METIERS

Unidad de Enseñanza de Especialidad
« Bioingeniería »

MEMORIA FINAL
(Resumen traducido)

Contribución a la puesta en marcha de un banco de ensayos para la evaluación de la respuesta del cuerpo humano a aceleraciones lineales

**LABORATORIO DE BIOMECAÁNICA
ARTS ET METIERS PARISTECH**

Defendido el 23 de enero 2013
Traducción del francés finalizado el 3 de julio del 2013

Autor : Alejandro CASAMAYÓN ANTÓN

Director de proyecto: Dominique SALETTI
Equipo pedagógico: Baptiste SANDOZ
Sébastien LAPORTE

RESEÑA BIBLIOGRÁFICA

AÑO : 2013

N° de PFC : PA-M12145

CENTRO DE AFILIACION DE PFC : Paris.

AUTORES : Alejandro Casamayón Antón.

TITULO : Contribution à la mise en place d'un banc d'essai pour l'évaluation de la réponse du corps humain à des accélérations linéaires.

RESPONSABLES DEL PFC : Dominique Saletti; Baptiste Sandoz ; Sébastien Laporte ;
Laboratoire de Biomécanique.

NÚMERO DE PÁGINAS, NÚMERO DE REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS: -- ; 16

RESUMEN : El SLED es un banco de ensayos concebido para estudiar la respuesta del cuerpo humano a las aceleraciones lineales. La precisión en la respuesta del ensayo debe de ser lo mayor posible. Es necesario por lo tanto analizar las fuerzas de rozamiento y las transmisiones de potencia más críticas para optimizar su funcionamiento.

PALABRAS CLAVE : Banco de ensayos, SLED, Wiplash, coeficiente de rozamiento, correas, tensión, tensor.

ACCESO AL DOCUMENTO:

PARTIE A REMPLIR PAR LE PROFESSEUR RESPONSABLE DU PROJET

ACCESSIBILITE DE CE RAPPORT (entourer la mention choisie) :

Classe 0 = accès libre

Classe 1 = Confidentiel jusqu'au _ _ _ _ _

Classe 2 = Hautement confidentiel

Date : 23/01/2013

Nom du signataire : Sébastien Laporte

Signature :

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mis profesores Dominique Saletti, Baptiste Sandoz y Sébastien Laporte su apoyo, comprensión y ayuda. Sin vuestros consejos y exigencias no habría logrado llevar a buen término este proyecto.

También quiero dedicar este proyecto a mis padres y a mi hermano Jorge, porque sin sus sabios consejos, su apoyo y sacrificios no habría llegado a donde estoy ni ser quien soy.

A mi tío Javi y a mis abuelos Emilio, Isabel y Teresa porque son objeto de mi admiración y un ejemplo de superación ante las adversidades de la vida. Porque pese a tener una visión algo particular de la realidad, siempre son capaces de arrancarme una sonrisa.

A todos mis amigos. Pedro, Carlos, Daniel... con los que he compartido innumerables horas de estudio, y también de diversión.

A tantas otras personas imposibles de nombrar que me han acompañado, que sin sus ánimos y cariño habría sido mucho más difícil el camino hasta aquí.

Y a Móni, porque ha hecho como suyos los momentos difíciles, pero que pese a todo, siempre me ha dado su apoyo incondicional, porque me ha ayudado a valorar más los éxitos obtenidos. Y porque estará a mi lado en las « aventuras » venideras de la nueva etapa que se abre en mi vida.

Índice

ÍNDICE	4
1 INTRODUCCIÓN	6
1.1 CONTEXTO	6
1.1.1 LESIONES	7
1.2 SLED	7
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO	8
2 ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA	9
2.1.1 MOTOR	9
2.1.2 CORREA C1	9
2.1.3 ÁRBOL DE TRANSMISIÓN	10
2.1.4 CORREA C2	11
2.1.5 EL TRINEO DEL SOPORTE	12
2.2 ANÁLISIS DEL SOPORTE	12
2.2.1 TORSOR ESTÁTICO	14
2.2.2 TORSOR DINÁMICO	15
2.2.2.1 Principio Fundamental de la Dinámica	15
2.3 CONCLUSIONES	15
3 COEFICIENTE DE ROZAMIENTO	16
3.1 INTRODUCCIÓN	16
3.1.1 INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS	16
3.1.2 RESULTADOS ESPERADOS	16
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.2.1 ESQUEMA DEL ENSAYO	17
3.2.1.1 Etapa 1	17
3.2.1.2 Etapa 2	17
3.2.1.3 Etapa 3	18
3.2.2 CÁLCULOS	18
3.2.3 PRIMEROS ENSAYOS	19
3.2.3.1 Protocolo de experimentación	19
3.2.3.1.1 Materiales	19
3.2.3.1.2 Proceso	20
3.2.3.2 Resultados	20
3.2.3.3 Conclusiones	21
3.2.4 ENSAYOS FILMADOS	21
3.2.4.1 Materiales y métodos	21
3.2.4.1.1 Materiales	21
3.2.4.1.2 Proceso	21
3.2.9.1 Análisis de los vídeos	23

3.2.9.2	Resultados	24
3.2.10	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	25
4	TENSIÓN DE LA CORREA	27
4.1	INTRODUCCIÓN	27
4.1.1	VALOR DE LA PRETENSIÓN	27
4.2	MATERIAL Y MÉTODO	28
4.2.1	CORREA	28
4.2.2	TIPOS DE TENSORES	28
4.2.2.1	Polea tensora	28
4.2.2.2	Distanciamiento de las poleas	29
4.2.3	RESULTADOS	30
4.2.3.1	Desarrollo del tensor elegido	30
4.2.3.2	Medidor de tensión	32
5	CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS	32
5.1	CONCLUSIONES	32
5.2	PERSPECTIVAS	33
5.2.1	REVISAR EL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO	33
5.2.2	VALIDACIÓN MECÁNICA DEL TENSOR	33
5.2.3	COMPRA DE HERRAMIENTAS	33
5.2.4	CONCEPCIÓN DEL ASIENTO	34
6	BIBLIOGRAFÍA	35

1 Introduction

1.1 Contexto

Desde un mandato del 30 de noviembre de 1993, la Unión Europea está dotada de una base de datos de accidentes automovilísticos llamada CARE. Fue creada por la Dirección General de Movilidad y Transporte (DG MOVE) de la Comisión Europea.

La comisión Europea lanzó en 2003 un programa de acción en seguridad vial con objetivo la reducción de un 50% los fallecidos en las carreteras para finales del 2010. Durante este plazo se consiguió disminuir las muertes en un 44%, que sin ser el objetivo marcado, es un buen resultado. La Comisión prevé reducir de nuevo el 50% de los fallecidos a lo largo de los próximos diez años.

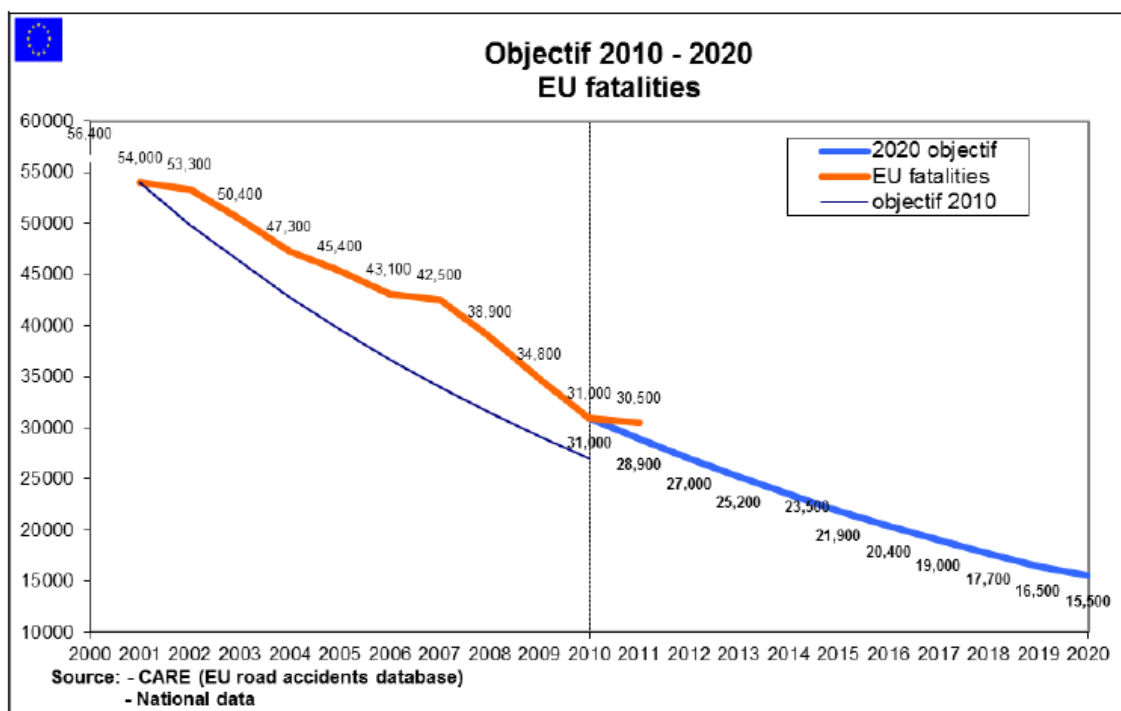


Imagen1 : Número de muertes en la UE y objetivos

Si nos centramos en Francia, la mortalidad en las carreteras constituye el 12.9% del total europeo. En el 2010 figuró como el país 24º en el rango de reducción de muertes anual.

Durante el año 2010 hubo 3992 fallecidos y en torno a 67000 heridos, una reducción de un 6.6% y 7.0% respectivamente en relación con el año anterior. Estos datos son positivos e invitan a seguir trabajando en la misma línea para continuar reduciendo el número de fallecidos y heridos en accidentes de tráfico. (ROUTIERE, 2011) (European Commission)

1.1.1 Lésiones

El tipo de lesión más común en un accidente de tráfico es a nivel del cuello. (Eustache).

Con la aparición del reposa cabezas como elemento de seguridad pasiva obligatorio en los vehículos, la gravedad de estas lesiones ha disminuido considerablemente, pero todavía tiene un gran margen de mejora.

La mayor parte de los accidentes se producen en zonas urbanas y no en carreteras interurbanas (Assureurs Prévention). Las colisiones más comunes por lo tanto son producidas por alcances a baja velocidad. Pese a que el choque aparentemente puede ser leve, la deceleración sufrida puede ser importante, causante de las lesiones cervicales. El peso de una cabeza de un adulto ronda los 5kg. Esta masa tiene una fuerza de inercia considerable en el momento del choque que es soportada solamente por los músculos del cuello.

El Whiplash es un movimiento brusco del cuello, realizando primero un movimiento de hiper-extensión seguido de una hiper-flexión. Este fenómeno puede ocasionar lesiones musculares hasta daños en la columna cervical dependiendo de la gravedad del choque.

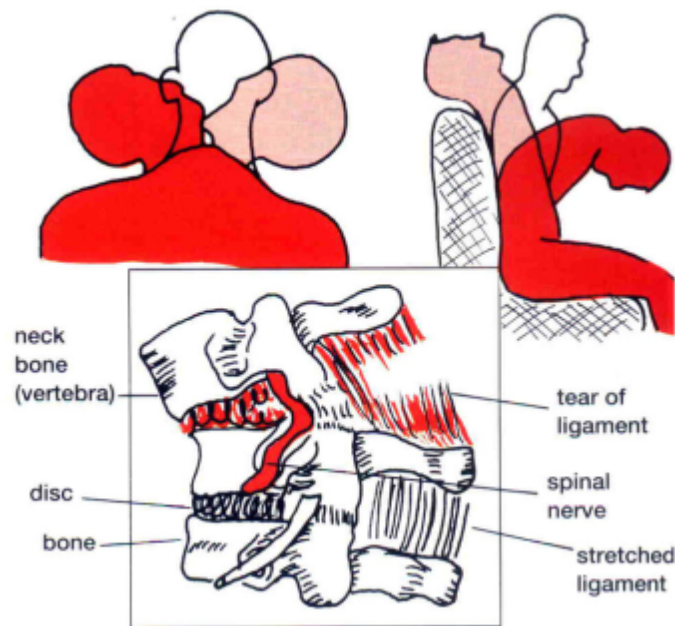


Imagen 2 : Whiplash

A fin de comprender mejor este fenómeno, el laboratorio de biomecánica de la ENSAM ha construido un banco de ensayos que va a permitir simular el movimiento del cuello a lo largo de una aceleración controlada.

1.2 SLED

El SLED es un banco de ensayos capaz de realizar aceleraciones lineales. Está compuesto principalmente por un trineo guiado por raíles y traccionado por un sistema de poleas y correas dentadas. El banco de ensayos cuenta también de una serie de sensores que nos ayudan a recuperar la información durante los ensayos, un motor eléctrico y un ordenador.

para monitorizar los movimientos del trineo. Es software utilizado para controlar el SLED es el LabVIEW.



Imagen 3: Vista del conjunto del SLED.



Imagen 4 : Esquema del SLED

1.3 Objetivos del proyecto

Actualmente el banco de ensayos está construido y es funcional. Sin embargo, el orden de magnitud del tiempo de duración de un choques de milisegundos. Es necesario entonces que el SLE funcione con la mayor precisión posible durante la fase transitoria de la aceleración del trineo. Los puntos abordados en este proyecto persiguen esta finalidad.

En un primer momento se ha realizado una modelización mecánica del SLED con el fin de analizar las partes críticas donde debemos profundizar en su estudio. Los parámetros que se estudian en este proyecto son el coeficiente de rozamiento del sistema y la tensión de la correa de transmisión.

2 Análisis de las pérdidas de potencia

Es importante saber dónde se encuentran las mayores pérdidas de potencia durante la transmisión del par del motor hasta el asiento. Es determinante poder aplicar al asiento una aceleración precisa durante los ensayos, tenerlo lo más controlado posible. Conociendo la pérdida de potencia, será posible compensarla adaptando el par motor comandado desde el ordenador para obtener a la salida la aceleración deseada..

2.1.1 Motor

El motor utilizado es un motor eléctrico controlado en par. Es capaz de generar un par de $C = \pm 32.5 Nm$. Somos conscientes que habrá pérdidas internas de potencia que se disipa en forma de calor, pero para un primer cálculo se ha supuesto el motor como ideal. Por tanto no tendremos en cuenta dichas pérdidas de potencia. Para conocer con exactitud el rendimiento del motor, se deberá medir el par de salida del mismo (polea 1) *ver imagen 4* y compararlo con el par demandado a través del LabVIEW..



Imagen 5 : Motor eléctrico

2.1.2 Correa C1

La correa C1 es una correa dentada de poliuretano que transmite la potencia del motor a la estructura del SLED a través de un sistema de poleas llamadas en este estudio 1 y 2 (*ver imagen 4*).

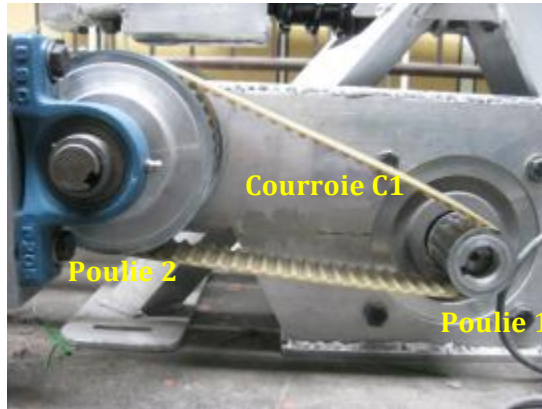


Imagen 6 : Transmisión polea 1 y 2

Las poleas 1 y 2 no tienen el mismo número de dientes ($n_1=14$; $n_2=40$), por tanto la transmisión del par entre las dos poleas tiene una relación de reducción de $r = \frac{20}{7} \approx 2.86$.

Las pérdidas aquí de potencia son despreciables siempre y cuando la correa esté correctamente colocada y tensada, ya que la distancia entre poleas es inferior a 60cm. Se considerará que el rendimiento en los dos sentidos de giro es el mismo, y las vibraciones de la correa no ocasionan problemas de resonancia, pues no funciona a un régimen constante ni durante un periodo de tiempo largo para que se reproduzcan (Tabary).

2.1.3 Árbol de transmisión

La potencia es transmitida entre las poleas 2 y 3 por un árbol de transmisión fabricado en acero. Las dos poleas tienen las mismas dimensiones y dientes, por lo que la relación de reducción aquí en la unidad, no se multiplicará aquí el par aplicado.

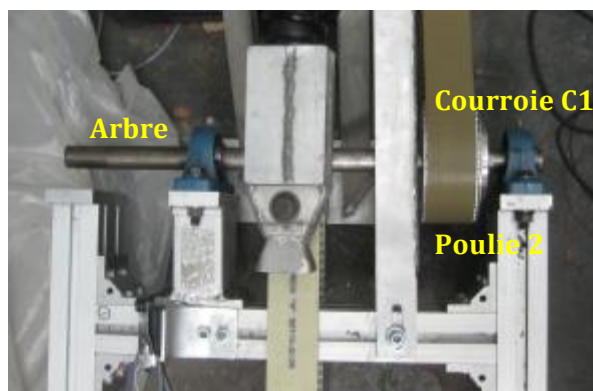


Imagen 7 : árbol de transmisión

Las pérdidas de potencia son mínimas a través del árbol. La zona donde podemos ver disminuida la potencia transmitida será en los rodamientos que permite el giro relativo de la barra con la estructura del SLED.

Se ha hecho un estudio de la posible torsión del árbol cuando soporta el par a transmitir, obteniendo como resultado una torsión prácticamente nula. Ver el anexo 1 para más información.

2.1.4 Correa C2

La correa C2 es la encargada de traccionar el carro donde se sitúa el asiento. La correa C2 será un elemento a estudiar más en detalle, pues al estar las poleas separadas una distancia de 5 m, su respuesta no será la misma siempre.



Imagen 8 : Correa y disco del banco de ensayos

Véase aquí las condiciones principales se debe tener en cuenta cuando hacemos un estudio de una transmisión por correa de transporte según « Manuel de Transporteur à Courroie en Auge » (Tabary) :

- Si la distancia entre poleas es superior a 60cm no se puede afirmar que el rendimiento de la correa sea el mismo en el ramal flojo que en el ramal tenso.
- Se recomienda utilizar solamente el ramal tenso cuando se trata de una correa de transporte de masa.
- Evitar las grandes distancias entre poleas.
- Si se va a colocar un tensor en una de las poleas, ésta debe de ser al polea conducida.

En el caso del SLED la distancia entre poleas es de 5.5m. Habrá por lo tanto un rendimiento menor en la transmisión en el ramal flojo que en el tenso. Esto nos obliga a utilizar solamente un sentido de la marcha, ya que el trineo está atado siempre al ramal superior de la correa..

Si se hace girar el motor en sentido horario, el ramal tenso será el que queda arriba (*ver imagen 9*). El desplazamiento del asiento deberá ser entonces de izquierda a derecha durante los ensayos.

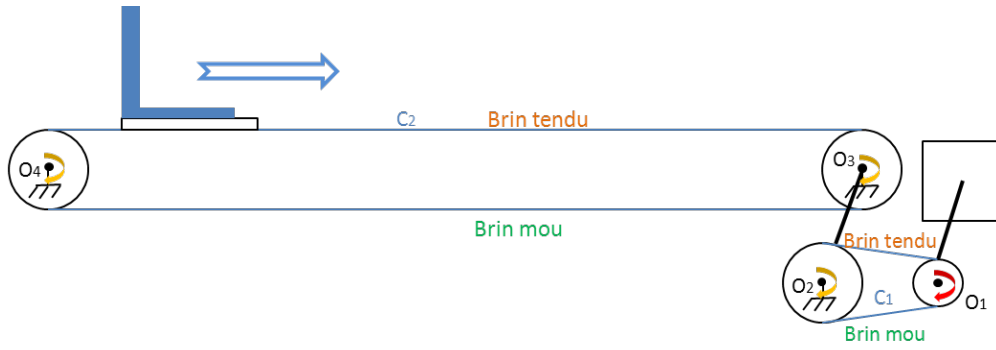


Imagen 9 : Esquema del sentido preferente de la marcha

2.1.5 El trineo del soporte

Es trineo es una parte del simulador a destacar, ya que es donde se ancla el asiento. Es interesante conocer los esfuerzos a los que está sometido el trineo, con el fin de aplicar el par correcto con el motor. Haremos un estudio de fuerzas centrado en este elemento y ver las fuerzas principales a las que está sometido durante el desplazamiento.

2.2 Análisis del soporte

En primer lugar vamos a aislar el soporte del resto de los sistemas para analizar más fácilmente las fuerzas que actúan sobre él (ver imagen 10).

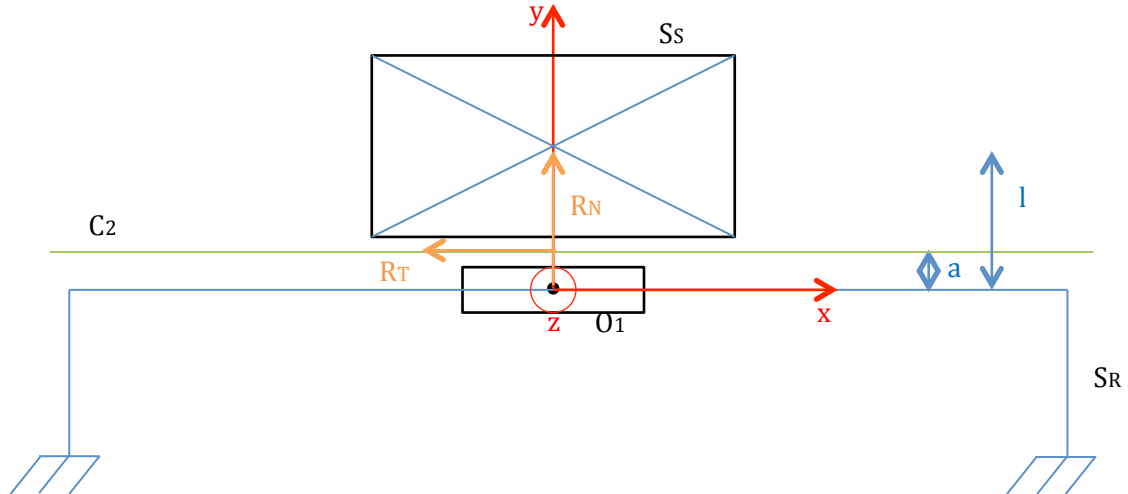


Imagen 10 : Esquema de fuerzas sobre el soporte.

Para la realización del análisis nos hemos ayudado del documento de (Agati, Brémont, & Delville).

Véase a continuación la tabla con las variables de las ecuaciones :

Tabla 1 : Resumen de las variables utilizadas

Símbolo	Definición
C_2	Correa de transmisión
S_S	Sólido del asiento
S_R	Sólido de los raíles
O_1	Punto de contacto entre el soporte y el rail
R_T	Resistencia tangencial
R_N	Resistencia normal
a	Distancia entre el punto de contacto y la correa
l	Distancia entre el punto de contacto y el centro de gravedad del asiento
\vec{F}	vector de fuerzas
\vec{M}	Vector de momentos
N	Fuerza normal
\vec{P}	Peso del asiento más reacciones normal y tangencial
T_{C2}	Tensión de la correa
J	Momento de inercia
\vec{a}	vector aceleración lineal

$\vec{\omega}$

vector aceleración angular

f

coeficiente de rozamiento

M_1

La masa sobre punto 1

Vamos a realizar en primer lugar un estudio del tensor estático y del torsor dinámico para deducir las ecuaciones que gobiernan el soporte.

2.2.1 Torsor estático

$$(1) \left\{ \mathcal{T}_{(S_R \rightarrow S_S)} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} -R_T \cdot \vec{x} + R_N \cdot \vec{y} \\ N \cdot \vec{z} \end{array} \right\}_{(O_1, \mathcal{R})}$$

$$(2) \left\{ \mathcal{T}_{(\vec{P} \rightarrow S_S)} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} -m \cdot g \vec{y} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{(G_1)}$$

$$(3) \left\{ \mathcal{T}_{(C_2 \rightarrow S_S)} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} T_{C_2} \cdot \vec{x} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{(A)}$$

Lo que se busca con el análisis :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \\ \sum \vec{M} = J \cdot \vec{\omega} \end{array} \right. \quad \text{ou} \quad \left\{ \mathcal{T}_{(\vec{S}_S \rightarrow S_S)} \right\} = \left\{ \mathcal{D}_{(S_S/R)} \right\}$$

Nos centramos en el punto O_1

$$\left\{ \mathcal{T}_{(\vec{S}_S \rightarrow S_S)} \right\} ?$$

(1) no cambia.

(2) Transport moment :

$$\vec{M}_{(O_1, \vec{P} \rightarrow S_S)} = \vec{M}_{(C_1, \vec{P} \rightarrow S_S)} + \vec{O}_1 \wedge \vec{P} \rightarrow S_S = \vec{0} + l \vec{y} \wedge (-mg) \vec{y} = 0$$

$$\left\{ \mathcal{T}_{(\vec{P} \rightarrow S_S)} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} -m \cdot g \vec{y} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{(O_1, \mathcal{R})}$$

(3) Transport moment :

$$\vec{M}_{(O_1, C_2 \rightarrow S_S)} = \vec{M}_{(A, C_2 \rightarrow S_S)} + \vec{O}_1 \wedge \vec{A} \rightarrow C_2 = \vec{0} + a \vec{y} \wedge T_{C_2} \vec{x} = -a T_{C_2} \vec{z}$$

$$\left\{ \mathcal{T}_{(C_2 \rightarrow S_S)} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} T_{C_2} \cdot \vec{x} \\ -a T_{C_2} \vec{z} \end{array} \right\}_{(O_1, \mathcal{R})}$$

Tenemos un torsor estático de fuerzas y momentos en el soporte

$$\left\{ \mathcal{T}_{(\vec{S}_S \rightarrow S_S)} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} (-R_T + T_{C_2}) \cdot \vec{x} + (R_N - mg) \cdot \vec{y} \\ N - a \cdot T_{C_2} \cdot \vec{z} \end{array} \right\}_{O_1, \mathcal{R}}$$

2.2.2 Torsor dinámico

$$\{\mathcal{D}_{(S_s, \mathcal{R})}\} = \left\{ \begin{array}{c} M_1 \vec{a}_{(G1, S_s/\mathcal{R})} \\ \delta_{O1(S_s/\mathcal{R})} \end{array} \right\}_{O1}$$

$$(4) \vec{a}_{(G1, S_s/\mathcal{R})} = \ddot{\vec{x}} \cdot \vec{x}$$

$$(5) \vec{\delta}_{O1} = \int \overrightarrow{O1P} \wedge \overrightarrow{\Gamma}_{(P/\mathcal{R})} dm = \overrightarrow{O1G} \wedge \overrightarrow{\Gamma}_{G, (S_s/\mathcal{R})} \cdot M_1 = \overrightarrow{O1G} \wedge \ddot{\vec{x}} \cdot M_1 = \\ = M_1 l \vec{y} \wedge \ddot{\vec{x}} = -M_1 l \ddot{z} \vec{z}$$

$$\vec{\sigma}_{O1(S_s/R)} = \overrightarrow{\sigma_G} + M_1 \overrightarrow{V_{G/R}} \wedge \overrightarrow{GO_1} = \ddot{\vec{x}} \cdot M_1 \wedge -l \vec{y} = -M_1 l \ddot{x} \vec{z}$$

$$(6) \vec{\delta}_{O1 S/R} = \frac{d}{dt} (\vec{\sigma}_{O1(S_s/R)}) = -M_1 l \ddot{x} \vec{z}$$

On a finalement un torseur dynamique :

$$\boxed{\{\mathcal{D}_{(S_s, \mathcal{R})}\} = \left\{ \begin{array}{c} \ddot{x} \vec{x} \\ -M_1 l \ddot{x} \vec{z} \end{array} \right\}_{O1, \mathcal{R}}}$$

2.2.2.1 Principio Fundamental de la Dinámica

Una vez haber hallado los torsores de nuestro problema, podemos aplicar el principio fundamental de la dinámica y deducir los factores de los que depende el movimiento del disco de apoyo.

$$\left\{ \begin{array}{l} (7) R_T + T_{C2} = M_1 \ddot{x} \\ (8) R_N - M_1 g = 0 \\ (9) N - a T_{C2} = -M_1 l \ddot{x} \\ (10) R_T = f \cdot R_N \end{array} \right.$$

$$(8) : R_N = M_1 g$$

$$(7) \text{ et } (10) : R_T + T_{C2} = M_1 \ddot{x} \Leftrightarrow f \cdot R_N + T_{C2} = M_1 \ddot{x}$$

$$\boxed{f \cdot M_1 g + T_{C2} = M_1 \ddot{x}} \quad (11)$$

$$(9) \text{ et } (11) :$$

$$\boxed{N - a T_{C2} = -l f \cdot M_1 g + T_{C2}} \quad (12)$$

2.3 Conclusiones

Hemos demostrado que la aceleración del disco, y en consecuencia, del asiento, depende principalmente de la masa total (M_1), de la gravedad (g), de la tensión con la que tracciona la correa (T_{C2}) y del coeficiente de rozamiento (f).

La masa total y la tensión de la correa se puede medir fácilmente y ser controladas, por otro lado la aceleración de la gravedad es una constante conocida. Por lo tanto sólo nos queda conocer el coeficiente de rozamiento entre las ruedas del trineo y los railes.

3 Coeficiente de rozamiento

3.1 Introducción

3.1.1 Introducción a los ensayos

Se van a realizar una serie de ensayos con la finalidad de hallar el coeficiente de rozamiento cinético. El trineo se desplaza sobre los raíles apoyado sobre seis ruedas. El trineo cuenta también con cuatro pastillas de teflón que rozan directamente contra la estructura para evitar el movimiento transversal del trineo. Se va a proceder por lo tanto a deducir un valor experimental de rozamiento como suma de rozamiento de rodadura y de deslizamiento.

Según la ecuación del movimiento (11) del disco, debemos conocer el valor del coeficiente de rodadura entre las ruedas del trineo y los raíles.

3.1.2 Resultados esperados

Se pueden encontrar valores de coeficientes de rozamiento entre distintos materiales el distintas fuentes (Séquiès). Nos interesa de todas formas calcularlo experimentalmente, pues tal y como hemos dicho no tenemos un movimiento de rodadura ni de deslizamiento puro, y puede variar respecto al valor teórico según las condiciones de los materiales. A pesar de eso podemos ver esos valores como orientativos.

Para obtener el coeficiente de rozamiento, vamos a aislar el trineo de los elementos que puedan falsear el valor obtenido del real.

Tenemos la ecuación (11). $f \cdot M_1 g + T_{C2} = M_1 \ddot{x}$

Si desenganchamos los elementos que están unidos al trineo, eliminaremos el factor T_{C2} de la ecuación, ya que es un factor variable en el tiempo relacionado con la tensión de la correa.

Tendremos por lo tanto : $f \cdot g = \ddot{x} \Rightarrow \boxed{f = \frac{\ddot{x}}{g}} (13)$

Hemos encontrado una ecuación con la cual se puede deducir el valor del coeficiente de rozamiento fácilmente.

La deceleración esperada debe ser constante, ya que f y g también lo son. Para minimizar el error, se repetirá el ensayo varias veces. Es importante destacar que el coeficiente de rozamiento teóricamente no depende de la masa.

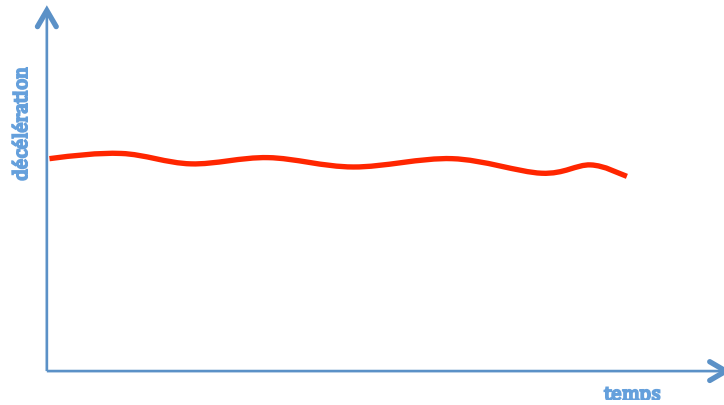


Imagen 11: Gráfico teórico de la deceleración

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Esquema del ensayo

A continuación se va a explicar el esquema general del ensayo y ver las etapas del mismo.

3.2.1.1 Etapa 1

Se aplica una fuerza al disco para desplazarlo y lo dejamos mover por sí solo. En el instante en el que el trineo avanza sin ninguna fuerza exterior lo consideraremos como el instante cero de nuestro ensayo.

$$\begin{cases} \text{velocidad} \neq 0 \\ t = 0 \end{cases}$$



Imagen 12: etapa 1 del ensayo

3.2.1.2 Etapa 2

En este instante el trineo es frenado solamente por la fuerza de rozamiento.

$$\begin{cases} \text{velocidad} \neq 0 \\ t \neq 0 \\ \ddot{x} \neq 0 \end{cases}$$

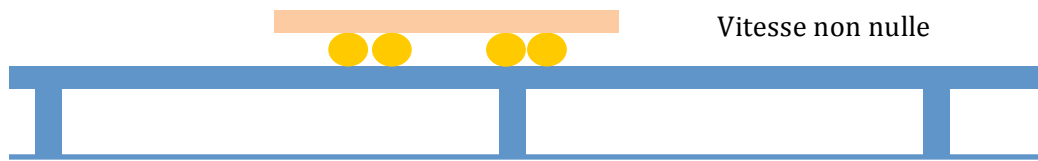


Imagen 13: etapa 2 del ensayo

3.2.1.3 Etapa 3

Ahora el trineo está totalmente parado. Registramos el tiempo y la distancia que le ha llevado llegar hasta este estado.

$$\begin{cases} \text{velocidad} = 0 \\ t \neq 0 \\ \ddot{x} = 0 \end{cases}$$



Imagen 14: etapa final del ensayo

A la espera de acelerómetros que faciliten la medición de la deceleración, se va proceder a filmar los ensayos para recuperar la distancia recorrida y el tiempo requerido para que se pare el trineo.

3.2.2 Cálculos

Los ensayos serán filmados, y a continuación se recuperarán los datos sobre un análisis a través de los videos. Vamos a deducir por lo tanto la ecuación que nos va a servir para estimar el coeficiente de rozamiento a partir de la ecuación (13) de la aceleración del disco.

Tabla 1: variables de las ecuaciones

	Unidades	Descripción
$\ddot{x}(t)$	m.s ⁻²	Función de aceleración del trineo
f	adim.	Coficiente de rozamiento
g	m.s ⁻²	Aceleración de la gravedad

t	s	tiempo
t_f	s	Tiempo final del ensayo
$\dot{x}(t)$	m.s ⁻¹	Función velocidad del trineo
$x(t)$	m	Función posición del trineo

Tenemos la ecuación y las condiciones iniciales que vemos a continuación:

$$(13) f \cdot g = \ddot{x}(t)$$

$$C.I. \begin{cases} t = t_f \rightarrow \dot{x}(t) = 0 \\ t = 0 \rightarrow x(t) = 0 \end{cases}$$

Si integramos dos veces y utilizamos las condiciones iniciales sobre las que trabajamos, obtendremos una ecuación que nos sea útil para calcular el rozamiento.

$$\int \ddot{x}(t) dt = \int f \cdot g dt \rightarrow \dot{x}(t) = f \cdot g \cdot t + A$$

$$\dot{x}(t_f) = 0 \Rightarrow A = -f \cdot g \cdot t_f$$

$$\int \dot{x}(t) dt = \int f \cdot g \cdot t dt - \int f \cdot g \cdot t_f dt \rightarrow$$

$$\rightarrow x(t) = \frac{1}{2} \cdot f \cdot g \cdot t^2 - f \cdot g \cdot t_f \cdot t + B$$

$$x(0) = 0 \rightarrow B = 0$$

Finalmente tenemos la ecuación:

$$\boxed{x(t) = \frac{1}{2} \cdot f \cdot g \cdot t^2 - f \cdot g \cdot t_f \cdot t} \quad (14)$$

3.2.3 Primeros ensayos

Los primeros ensayos realizados no han sido filmados. Se han utilizado un cronómetro y un metro para tener una primera estimación del valor del coeficiente de rozamiento. Es importante destacar que en estos primeros ensayos el trineo no tenía peso encima y se han realizado en el sentido de la marcha de izquierda a derecha.

3.2.3.1 Protocolo de experimentación

Véase a continuación los materiales y métodos de estos primeros ensayos.

3.2.3.1.1 Materiales

- Cronómetro digital.
- Cinta métrica de 5m de longitud..

3.2.3.1.2 Proceso

1. Desenganchar la correa
2. Marcar una posición de referencia sobre el perfil del raíl.
3. Impulsar manualmente el disco y soltar.
4. Poner en marcha el cronómetro en el momento en el que el carro pasa por la señal marcada de referencia.
5. Parar el cronómetro en el instante en el que el trineo se para completamente.
6. Medir la distancia recorrida.
7. Repetir los ensayos varias veces.
8. Calcular el coeficiente de rozamiento.

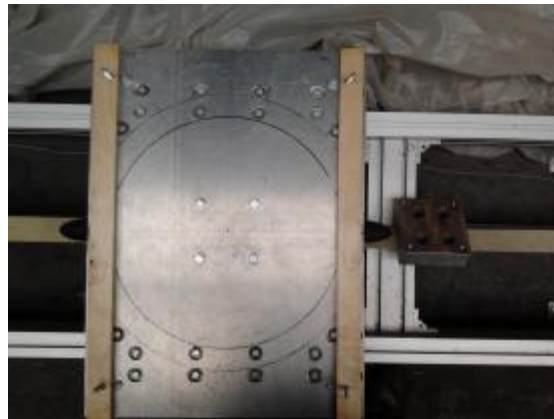


Imagen 15: Correa desenganchada del trineo

3.2.3.2 Resultados

Siendo conscientes de que con este procedimiento el error experimental es importante, podemos tener una primera estimación del coeficiente. Véase aquí la tabla con los ensayos que se dieron por válidos:

Si recuperamos la ecuación (14) obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 4: Datos y resultados de los ensayos

Ensayo	Tiempo (s)	distancia(m)	coeficiente
1	2.78	0.48	0,012662
2	3.92	1.24	0,016452
3	1.76	0.42	0,027643
4	3.0	0.67	0,015177
5	2.99	0.68	0,015507

Haciendo la media aritmética obtenemos como resultado:

$$f = 0,017 \pm 0,005$$

3.2.3.3 Conclusiones

A pesar de la imprecisión de tomar las medidas a mano, el resultado obtenido es aceptable. A la espera de los resultados de los ensayos filmados, el orden de magnitud del coeficiente de rozamiento es del usual de un coeficiente de rodadura. (Séquiès)

3.2.4 Ensayos filmados

Gravando los ensayos la toma de los datos será mucho más preciso que en los primeros ensayos realizados. Realizaremos los ensayos poniendo peso encima del trineo para ver la dependencia del coeficiente con la masa.

Hay que destacar que las pastillas de teflón rozan sobre los raíles de una forma diferente dependiendo del sentido de la marcha del trineo. Es esperable por lo tanto que el valor del coeficiente de rozamiento sea diferente según el sentido en el que se desplace el carro durante los ensayos.

Pese a que no es aconsejable trabajar sobre el ramal flojo de la correa, es decir, desde la polea conducida a la polea conductora, también se han realizado los ensayos es dicho sentido de marcha.

3.2.4.1 Materiales y métodos

3.2.4.1.1 Materiales

- Cámara a 30fps
- 6 miras ópticas
- 1 trípode
- 1 metro
- Masas de distinto peso (10, 20kg)

3.2.4.1.2 Proceso

1. Desenganchar la correa del trineo
2. Marcar las posiciones en donde vamos a colocar las miras (cada 50cm sobre los raíles)
3. Pegar las miras. 5 sobre los raíles y una sobre el trineo.
4. Posicionar la cámara lo más centrada posible y a una distancia tal que pueda enfocar a todas las miras del banco de ensayos.
5. Filmar con la cámara.
6. Impulsar el trineo y soltarlo.
7. Repetir los ensayos varias veces y en los dos sentidos de la marcha.
8. Poner masas sobre el disco y repetir los ensayos.
9. Analizar los videos obtenidos con el software Aviméca.

Se ha utilizado una cámara de fotos doméstica en los ensayos que recupera 30 imágenes por segundo. Aunque la calidad del video no es la ideal para hacer un análisis y controlar la posición del trineo en cada instante de tiempo, será suficiente para obtener resultados bastante aceptables.

Se han colocado miras ópticas cada 50cm sobre la estructura de los raíles para referenciar la distancia, y una mira más sobre el trineo que será la que utilizaremos como referencia de la posición de éste a lo largo del tiempo.



Imagen 16: SLED con las miras ópticas

Se han repetido los ensayos varias veces para cada dirección y para cada masa. Véase la tabla con e número de ensayos realizados y los analizados con el software:

Tabla 2 : Número de videos filmados y analizados según el sentido y la masa

		3.2.5	Peso	3.2.6	Número de	3.2.7	Videos
3.2.8	Sentido del ensayo		0		5		5
		3.2.9 Izda. - dcha. (ramal tenso)	40		4		3
			60		4		3
			90		4		3
		Dcha. - izda. (ramal flojo)	0		4		3
			40		3		2
			60		3		2
			90		3		2

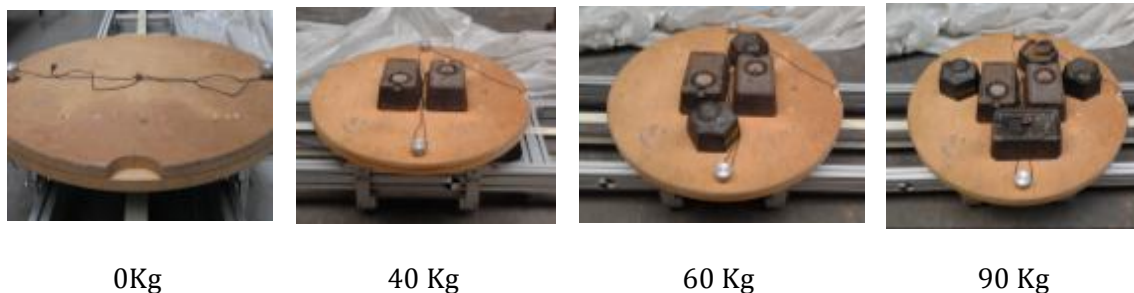


Imagen 17: Fotos del disco con las masas sobre él

Hay que destacar que se ha realizado siempre un ensayo menos en el sentido del ramal flojo respecto a los realizados en el ramal tenso. Se ha excluido también el vídeo que era menos aceptable para su análisis en cada par de condiciones de sentido y masa. La razón de esta supresión es la reducción de tiempo para analizar numerosos videos.

3.2.9.1 Análisis de los vídeos

El programa utilizado para el análisis de la posición del trineo, tal y como habíamos comentado anteriormente, es el Aviméca.

En primer lugar se marca la distancia entre dos puntos de referencia, en nuestro caso hemos tomado la distancia entre dos miras, y se indica la distancia entre los puntos.

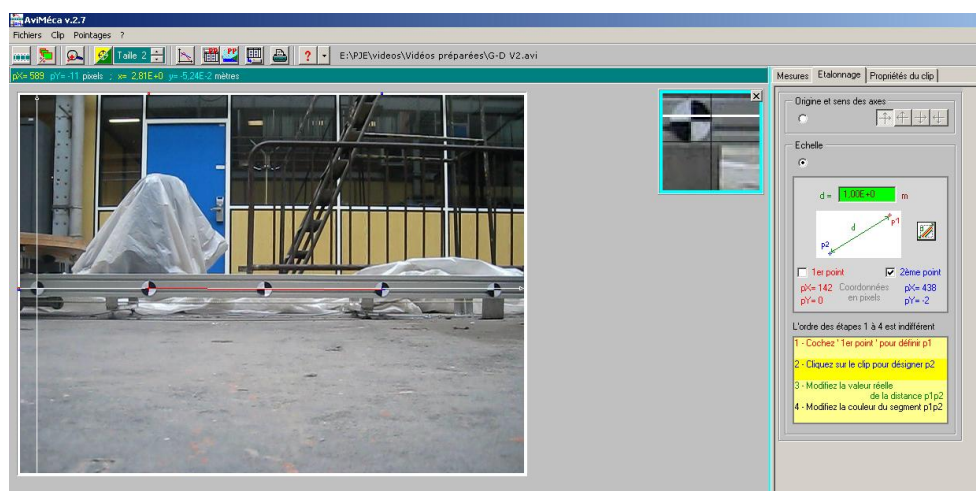


Imagen 18: Captura del programa Aviméca

A continuación se señala el origen de coordenadas, que hemos colocado siempre sobre la mira del trineo en el instante cero del ensayo.

Finalmente se marca manualmente la posición del trineo en cada fotograma desde el instante en que se garantiza que éste se desplaza sin ningún tipo de impulso hasta que se para totalmente. El programa nos ofrece también la coordenada Y de la posición marcada, pero en nuestro caso no es importante, pues el desplazamiento es siempre sobre el eje x. Si el dato de distancia sobre el eje Y es distinto de cero, es por error al marcar manualmente la posición me la mira.

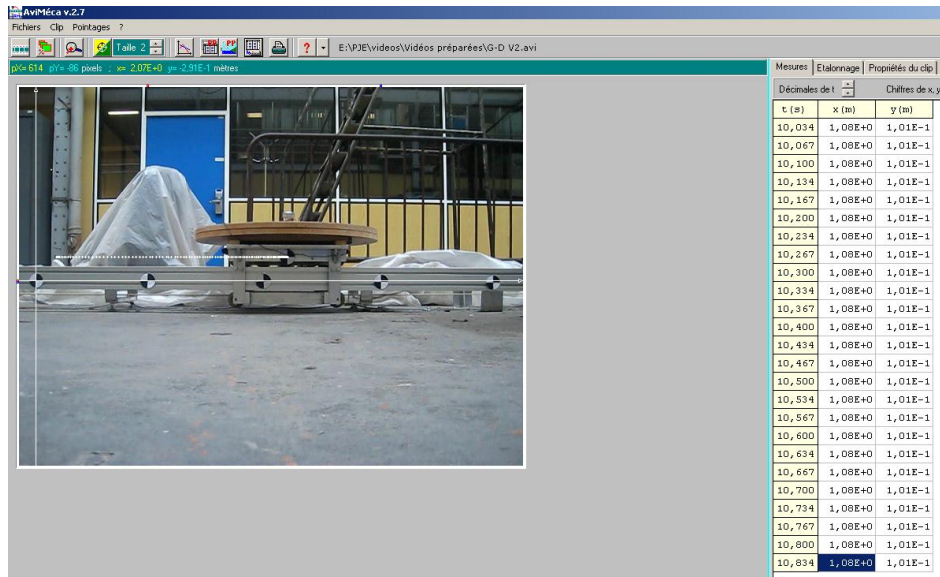


Imagen 19: Captura del momento de posicionamiento del trineo

3.2.9.2 Resultados

Podemos ver en el Excel que la relación de los datos obtenidos de posición – tiempo sigue una parábola. Una función lógica, pues la ecuación de la posición en un movimiento uniformemente acelerado es parabólica.

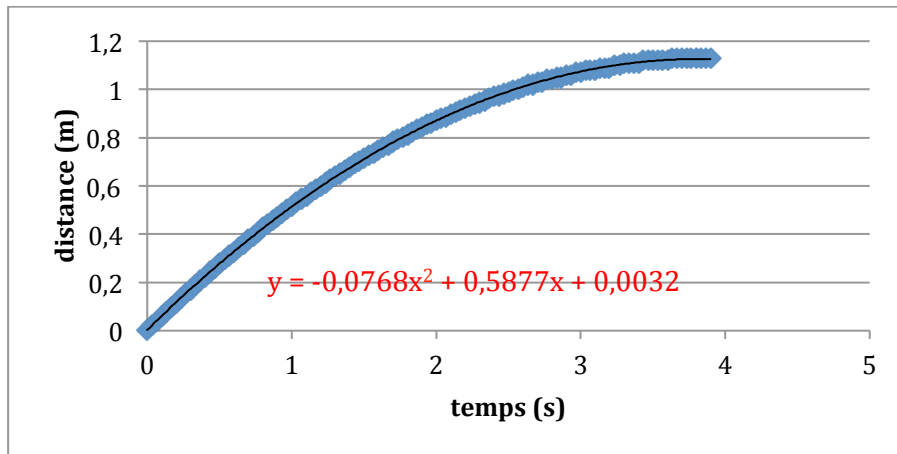


Imagen 20: Gráfica de uno de los videos analizados

Para obtener el coeficiente de rozamiento, comparamos el valor experimental de la curva que acompaña al término cuadrático con la definición teórica.

$$\begin{cases} x(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0 \text{ (théorie)} & (15) \\ x(t) = At^2 + Bt + C \text{ (expérimental)} & (16) \end{cases}$$

Con (15) y (16) se obtiene:

$$A = \frac{1}{2}a \Rightarrow A = \frac{1}{2}fg \quad (17)$$

Véase a continuación la tabla de Excel que recupera todos los resultados de los videos de los ensayos realizados en ambas direcciones:

Tabla6: Resumen de los resultados del coeficiente de rozamiento según el sentido y la masa

sens gauche-droite (brin tendu)				sens droite-gauche (brin mou)			
vidéo	poids (kg)	A	coefficient	vidéo	poids (kg)	A	coefficient
0_1	0	0,0793	0,01616718	0_1	0	0,0936	0,01908257
0_2	0	0,0757	0,01543323	0_2	0	0,0945	0,01926606
0_3	0	0,0782	0,01594292	0_3	0	0,0928	0,01891947
0_4	0	0,0787	0,01604485	---	---	---	---
0_5	0	0,0768	0,01565749	---	---	---	---
résultat	0,0160		0,0002	résultat	0,0191		0,008
40_1	40	0,0651	0,01327217	40_1	40	0,0785	0,01600408
40_2	40	0,0621	0,01266055	40_2	40	0,0795	0,01620795
40_3	40	0,0618	0,01259939	---	---	---	---
résultat	0,0128		0,0003	résultat	0,0161		0,0001
60_1	60	0,0592	0,01206932	60_1	60	0,0757	0,01543323
60_2	60	0,0593	0,0120897	60_2	60	0,0779	0,01588175
60_3	60	0,0587	0,01196738	---	---	---	---
résultat	0,0120		5E-05	résultat	0,0157		0,0002
90_1	90	0,0559	0,01139653	90_1	90	0,0675	0,01376147
90_2	90	0,0556	0,01133537	90_2	90	0,0704	0,0143527
90_3	90	0,0559	0,01139653	---	---	---	---
résultat	0,0114		3E-05	résultat	0,0141		0,0003

3.2.10 Conclusiones y discusión

A continuación, con el fin de compara los resultados obtenidos del coeficiente de rozamiento, se va a mostrar una gráfica con el valor medio obtenido por cada par de parámetros:

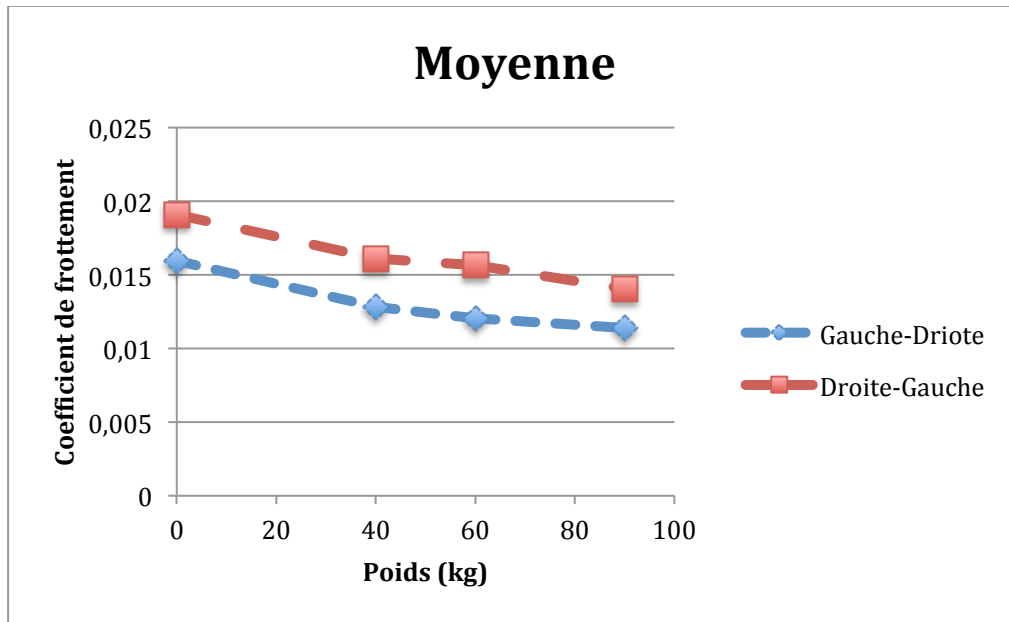


Imagen 21: Gráfica del coeficiente de rozamiento según la masa y el sentido

Los resultados obtenidos son lógicos, ya que tienen el orden de magnitud de los coeficiente de rozamiento de rodadura teóricos (Séquière). Si se compara el resultado obtenido en los primeros ensayos realizados con los obtenidos a través del análisis de los vídeos sin masa y el sentido de izquierda a derecha, se observa que son muy próximos. Podemos entonces afirmar que el valor obtenido es válido.

Observando la gráfica, es destacable que el coeficiente de rozamiento sea siempre superior cuando se desplaza el trineo de derecha a izquierda que a la inversa. Este fenómeno es debido a las pastillas de teflón que guían el trineo transversalmente. Su forma de deslizarse contra el perfil de los raíles es diferente dependiendo de la marcha, y en consecuencia su influencia sobre el valor del coeficiente de rozamiento total.

Es extraño que el valor del coeficiente de rozamiento disminuya con el peso, cuando teóricamente ambos factores no tienen relación de dependencia. El coeficiente de rodadura depende del radio y de la superficie entre los dos materiales. Si sobre la rueda aplicamos una fuerza vertical y hacia abajo, se espera que la superficie de contacto aumente, y en consecuencia el valor del coeficiente de rozamiento.

Podemos explicar este fenómeno, a priori inesperado, con los rodamientos de las ruedas. El trineo está montado sobre seis ruedas de patín que utilizan rodamientos de bolas para realizar el movimiento de giro. Este tipo de rodamientos necesita una fuerza de precarga para evitar que las bolas del rodamiento deslicen con las paredes. Es posible que con la masa, el rendimiento de los rodamientos aumente, disminuyendo en consecuencia el valor del coeficiente de rozamiento.

4 Tensión de la correa

4.1 Introducción

Para un buen funcionamiento del simulador, la correa debe tener una pretensión para minimizar los problemas de pérdida de potencia, de ruido y de las vibraciones.

En el caso de las correas dentadas, debemos añadir a los problemas anteriormente citados el posible salto de dientes entre la correa y la polea si la tensión no es suficiente, y en consecuencia, el deterioro de los elementos de la transmisión será más severa.

4.1.1 Valor de la pretensión

El valor de la pretensión va a depender de la distancia entre poleas, el número de poleas que están involucradas en la transmisión y principalmente de la potencia a transmitir.

El contexto que a nosotros nos interesa son las correas dentadas. La pretensión en este caso será: (Forbo)

Tabla 7: Variables de la pretensión

símbolo	definición
F_{fr}	fuerza de rozamiento
F_a	fuerza a aplicar para obtener una aceleración
F_u	suma de fuerzas
$F_{u\max}$	suma de fuerzas por factores de compensación
F_{pre}	fuerza de pretensión
C_2	factor de funcionamiento ligado sobrecarga de corta duración
C_3	factor de funcionamiento ligado a la relación de transmisión

Sea $F_u = F_{fr} + F_a$ (18) et $F_{u\max} = F_u \cdot C_2 \cdot C_3$ (19)

Tomamos el valor de los coeficientes en las tablas de la literatura. (Forbo)

En nuestro caso los coeficientes serán:

$$C_2 = 1.1$$

$$C_3 = 0.1$$

La pretensión a aplicar viene definida en la siguiente ecuación:

$$F_{pre} \geq 0.5 F_{u\ max} \quad (20)$$

Finalmente, con (18), (19) y (20) se obtiene

$$F_{pre} \geq 0.5 (C_2 \cdot C_3 \cdot (F_{fr} + F_a)) \quad (21)$$

4.2 Material y método

4.2.1 Correa

La correa utilizada C2 (*ver imagen 4*) es la que va a tirar del trineo del asiento. Esta correa es una correa dentada « Breco M50T10-Q125 » cuyas propiedades principales son: (PIES)

- Material : Poliuretano
- Dimensiones :
 - ancho : 50mm
 - Espesor : 2mm
- Módulo de Young : 3000MPa (GONZALEZ)
- Tensión Máxima: 4200N
- Rango de Potencia : 0-30kW
- Velocidad máxima: 60 m/s

La correa soporta sin problemas las exigencias mecánicas a las que será expuesta en los ensayos, pero a pesar de ello es un sistema importante a calibrar si se quiere evitar problemas de funcionamiento óptimo del banco de ensayos.

4.2.2 Tipos de tensores

Se puede considerar el modo de trabajo de la correa del SLED como la de transporte de masa sobre ella. Se deberá por lo tanto desarrollar un tensor para la correa adecuado a dichas características de funcionamiento. (Pirelli) (Tabary)

4.2.2.1 Polea tensora

Con una polea tensora en la mitad de la longitud de la correa, reducimos la distancia entre poleas. Esto mejoraría posibles problemas vibratorios y de la fuerza centrífuga propia de la masa de la correa. Se recomienda colocar la polea tensora sobre el ramal flojo, sin embargo, en nuestro caso es imposible posicionarlo, pues no hay espacio suficiente. Si colocamos una polea tensora que desplace verticalmente la correa, ésta raza con la estructura que proporciona rigidez al propio raíl e impide un desplazamiento adecuado. (Intermec)

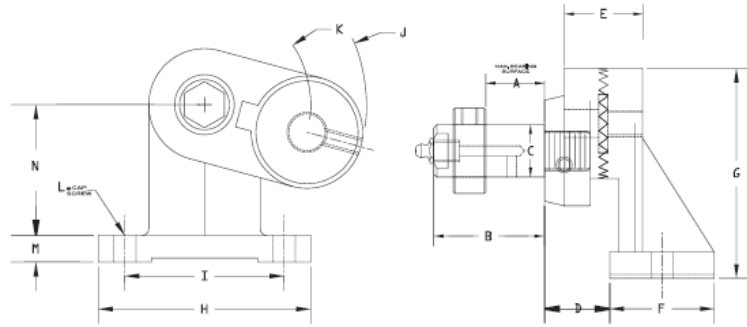


Imagen 22: Polea tensora



Imagen 23: Correa y perfil demasiado próximos

4.2.2.2 Distanciamiento de las poleas

Alejando las poleas, no tendremos el problema de la distancia entre la correa y la estructura del banco de ensayos como teníamos anteriormente. Según (Tabary) se recomienda emplazar el tensor sobre la polea conducida y no en la conductora.



Imagen 24: Espacio disponible para el tensor

4.2.3 Resultados

Se ha decidido optar por el alargamiento de la distancia entre poleas como método para tensar la correa. Se a poner por lo tanto un sistema adicional sobre la polea conducida utilizando el espacio que hay entre los perfiles de la estructura.

Este tipo de tensor no tiene las ventajas de la polea en cuestión de vibraciones y fuerza centrífuga, pero el tiempo de duración de los ensayos futuros ronda los 2 y 3 segundos. La correa no tiene en este periodo de tiempo un funcionamiento estacionario, y no tendrá problemas de resonancia.

4.2.3.1 Desarrollo del tensor elegido

Después de haber analizado diferentes tipos de tensores, se ha decidido desarrollar uno similar a la de un gato de tijera.

Este sistema será anclado a un perfil que será necesario acoplar. Sobre la imagen 25 podemos ver el perfil en azul rodeado de una línea naranja. Este perfil será fijo, mientras que el pintado en el esquema de rojo donde será atornillado la polea, podrá ser desplazado por el tensor.

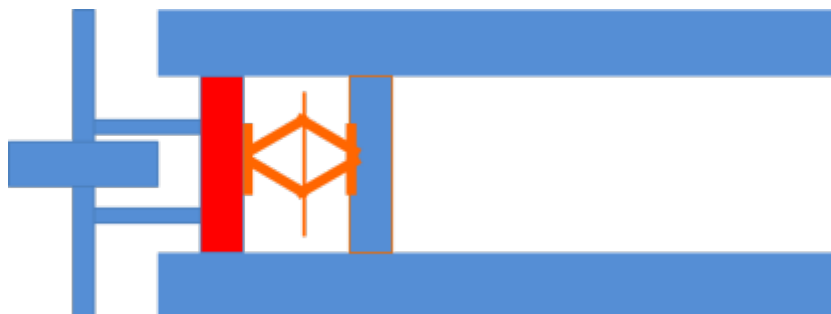


Imagen 25: Esquema del tensor

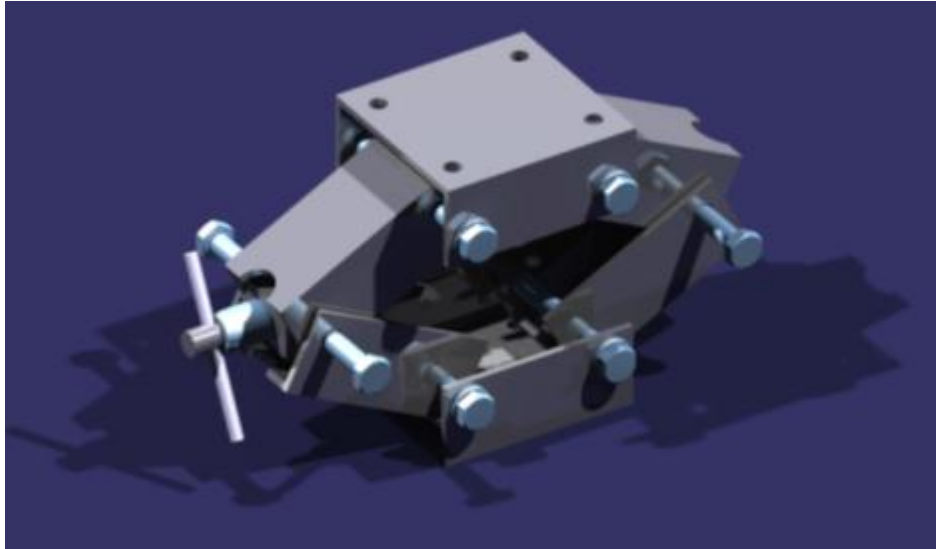


Imagen26: Tensor desarrollado

El espacio para colocar el tensor es limitado, es por esta razón que vamos a proponer construir un gato adecuado a nuestras necesidades y al espacio existente.

Se dispone de alrededor de un cubo de 10x40x25cm para colocar el tensor. En la imagen 27 el gato está montado sobre la estructura del SLED.

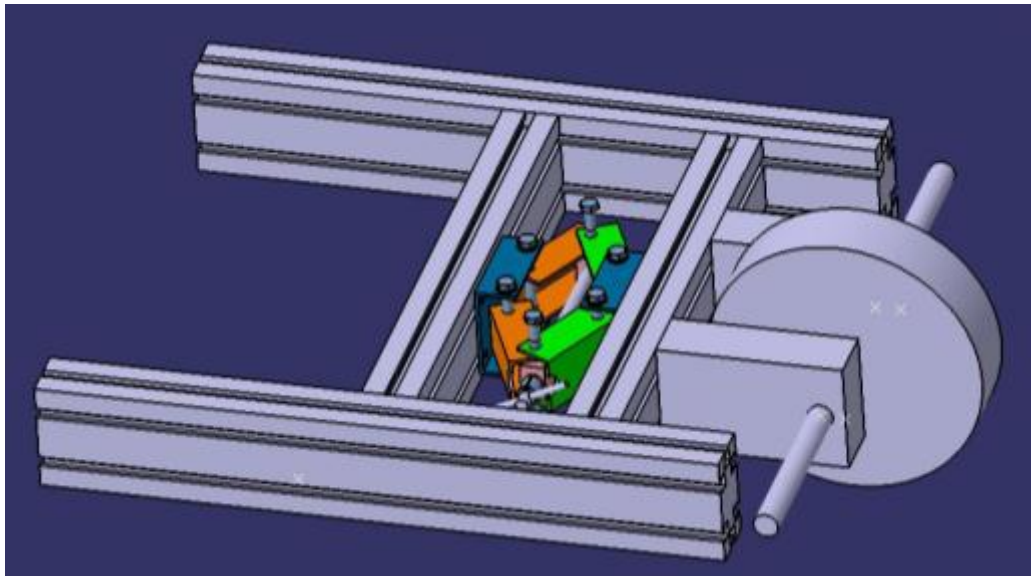


Imagen 27: Tensor instalado en el SLED

Los planos de las piezas del tensor son en el anexo (2).

Es importante destacar que el tensor propuesto a fabricar tiene solamente una validación geométrica. No hemos realizado un análisis mecánico del tensor para ver si soporta adecuadamente la fuerza a la que puede estar expuesta durante la pretensión.

4.2.3.2 Medidor de tensión

Pretensar la correa tiene la misma importancia que medir esta tensión. Hemos trabajado sobre un útil que sea posible utilizar para el correcto funcionamiento, pero es necesario medir la tensión aplicada.

Hay un sensor adaptado para medir la tensión de correas de distribución de vehículos. El modelo encontrado es el PCE-BTT 1.

Este modelos tiene una pinza a tres puntos que sujeta la correa. Una célula de carga situada en la pinza mide la fuerza necesaria para desviar la correa, que es proporcional a la tensión.

El sensor muestra directamente el resultado sobre una pantalla de cuatro cifras. El rango de medida es de 0 a 750N.



Imagen 28: Medidor de tensión

5 Conclusión y perspectivas

5.1 Conclusiones

Después de haber realizado este proyecto, la diferencia entre la aceleración de la consigna y la aceleración real ha disminuido. Hemos analizado los puntos más críticos de la pérdida de potencia y han sido aportadas soluciones.

Las partes críticas en relación con las pérdidas son la correa de transmisión y el trineo debido a fuerzas de rozamiento.

En el contexto de la fuerza de rozamiento, el valor del coeficiente obtenido se aproxima a los valores teóricos de rodamiento de sólidos. El resultado es sin embargo atípico. El coeficiente de rozamiento entre el trineo y los railes disminuye con el peso, y es siempre superior en el sentido de derecha a izquierda que a la inversa.

Durante los ensayos habrá siempre peso sobre el disco. Será por lo tanto recomendable utilizar el valor del coeficiente obtenido para el caso de 90kg, ya que será el que más se acerque a la realidad.

Este valor será: $f = 0.0114$ para la marcha de derecha a izquierda y de $f = 0.0141$ para el sentido inverso.

En relación con la correa, una buena tensión es indispensable para minimizar las diferentes problemáticas ligadas a la transmisión. La reacción del trineo será también más rápida, un aspecto importante cuando el orden de magnitud del tiempo de funcionamiento que nos interesa es de milisegundos.

La pretensión será diferente en función del sujeto que esté en el asiento y de la aceleración que se quiere aplicar. Se ha desarrollado un tensor que se puede montar en la estructura ya existente para facilitar la carga de la correa según convenga.

5.2 Perspectivas

5.2.1 Revisar el coeficiente de rozamiento

Los ensayos del coeficiente de rozamiento han sido realizados antes del desplazamiento del SLED. Será necesario revisar este valor una vez sea montado en el nuevo emplazamiento. Durante el montaje el coeficiente puede verse alterado debido sobre todo a un posicionamiento diferente de las placas de teflón.

5.2.2 Validación mecánica del tensor

El tensor propuesto a tenido solamente una validación geométrica. Las piezas de mueven entre ellas sin coacciones indeseables y tiene las dimensiones adecuadas para nuestras necesidades.

No tiene por el contrario una validación mecánica que asegure que es capaz de soportar la tensión impuesta. Antes de fabricar las piezas será necesario realizar un análisis estructural que aporte una validación mecánica.

5.2.3 Compra de herramientas

Algunos materiales son necesarios para continuar a desarrollar el SLED.

Principalmente, son necesarios acelerómetros para diferentes lugares del banco de ensayos. Para la validación del valor del coeficiente de rozamiento será recomendable utilizar uno, y de esta forma tener una lectura directa de la aceleración del trineo. Igualmente será necesario utilizar acelerómetros durante los ensayos del Whiplash, ya que deberemos conocer con precisión la aceleración del asiento.

En general, Es necesario acelerómetros con las siguientes características:

- Uniaxial. Los desplazamientos será siempre en un mismo eje.
- Un rango de medición de al menos 10g. Los ensayos serán realizados a aceleraciones menores, pero debemos tener un margen en la medida.
- Una buena sensibilidad en la mediad, pero se priorizará el rango de medición.

- El ruido de la señal debe de estar lejos de los valores típicos del ensayo para no distorsionar los resultados.

En relación a la correa, será necesario obtener un perfil para colocar el tensor. Un presupuesto ha sido pedido a Norcan para la compra de dos metros del perfil N166. Un medidor de tensión similar al propuesto es también necesario.

5.2.4 Concepción del asiento

Un sujeto importante en el desarrollo del banco de ensayos es el asiento. El paciente deberá estar sentado en posición de conducción, esto quiere decir que las piernas, los brazos y la espalda deben de estar correctamente posicionados.

La rigidez del material del asiento no deberá influir en la toma de medida por los sensores que se coloquen sobre él.

6 Bibliografía

- Agati, P., Brémont, Y., & Delville, G. (s.d.). *Mécanique du Solide Applications Industrielles*. DUNOD.
- Alonso, H. R. (s.d.). Transmisión por correas. (D. d. III, Éd.)
- Assureurs Prévention. (s.d.). Récupéré sur sur la route en voiture: <http://www.assureurs-prevention.fr>
- European Comission. (s.d.). Récupéré sur Movility and transport: http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/statistics/index_en.htm
- Eustache, I. (s.d.). *e-santé*. Récupéré sur zoom sur le coup de lapin: <http://www.e-sante.fr/zoom-sur-coup-lapin/actualite/807>
- FARGES, R. (s.d.). *Poulies et courroies de transmission - Entraînement synchrone*.
- Forbo. (s.d.). *Calcul des courroies dentées*.
- Gates Mectrol. (s.d.). *Catalogue Courroies Synchrones de polyuréthane*.
- GONZALEZ, E. B. (s.d.). *Polymères à Mémoire de Forme Etude du Polyuréthane et du blend Poly(ϵ -Caprolactone)/Styrène-Butadiène-Styrène*. ENSAM, Polumères.
- Intermec. (s.d.). *Tensores Universales*.
- PIES. (s.d.). *Polyurethane Timing Belts and Pulleys*.
- Pirelli. (s.d.). *Manual de Cálculo de cintas Transportadoras*.
- PLAY, D. (s.d.). Entraînement par courroies dentées - Calculs des répartitions de charge.
- ROUTIERE, D. D. (2011). *Securité Routière*. Récupéré sur Bilans annuels: <http://www.securite-routiere.gouv.fr>
- Séquiès, T. (s.d.). *Master Mécanique, Energétique et Ingénieries de Grenoble*. Récupéré sur Coefficient de frottement: <http://www-meca.ujf-grenoble.fr/data/frottements/frottements.html>
- Tabary, M. (s.d.). *Manuel pratique du transporteur à courroie en auge*.
- Wikipedia. (s.d.). Récupéré sur Coeficiente de rozamiento: http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_rozamiento